



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jozef Kimák

Charakterizace dvoudimenzionálního elektromagnetu

Katedra chemické fyziky a optiky

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Petr Němec, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Charakterizace dvoudimenzionálního elektromagnetu

Autor: Jozef Kimák

Katedra: Katedra chemické fyziky a optiky

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Petr Němec, Ph.D., Katedra chemické fyziky a optiky

Abstrakt: V rámci tejto práce boli skúmané veľkosť a smer magnetického poľa generovaného prototypom dvojdimenzionálneho elektromagnetu, ktorý bol nedávno skonštruovaný v Laboratóriu OptoSpintroniky. Tento elektromagnet je zložený z dvoch párov cievok s navzájom kolmými pólovými nadstavcami. Predovšetkým sme zistili, že správnym nastavením prúdu prechádzajúceho cievkami je možné reprodukovateľne rotovať smer poľa v rovine pólových nadstavcov s veľkosťou poľa približne 200 mT. Usúdili sme tiež, že generované pole je pomerne homogénne v oblasti s polomerom približne 5 mm, čo odpovedá rozmerom typickej vzorky. Na druhú stranu, funkčnosť elektromagnetu v oblasti nižších polí nemohla byť otestovaná jednoznačne kvôli technickým problémom s nami vyrobenou Hallovskou mierkou. Tento problém bude riešený v nasledujúcej práci.

Klíčová slova: magnetické pole, elektromagnet, homogenita poľa, hysterézia

Title: Characterization of two-dimensional electromagnet

Author: Jozef Kimák

Department: Department of Chemical Physics and Optics

Supervisor: prof. RNDr. Petr Němec, Ph.D., Department of Chemical Physics and Optics

Abstract: In this work we studied magnetic field magnitude and direction generated by a prototype of 2-dimensional electromagnet, which was recently constructed in Laboratory of the OptoSpintronics. This electromagnet is formed by two pairs of coils with a mutually perpendicular position of their poles. In particular, we revealed that, by appropriately setting the current through the coils, it is possible to rotate reproducibly the field direction in the plane of the poles for the field magnitude of about 200 mT. We also observed that the generated field is rather homogeneous in a region with a radius of about 5 mm, which corresponds to a typical sample size. On the other hand, the functionality of the electromagnet at lower fields could not be tested unambiguously due to technical problems with a home-made detection Hall probes. This problem will be addressed in the following work.

Keywords: magnetic field, electromagnet, field homogeneity, hysteresis

Týmto ďakujem svojmu vedúcemu prof. RNDr. Petru Němcovi, Ph.D. za ochotu, pomoc, svoj čas a prístup, cenné rady a pripomienky počas celého priebehu merania a písania tejto práce. Veľká vďaka patrí tiež RNDr. Eve Schmoranzerovej, Ph.D. a Mgr. Miloslavovi Surýnkovi nielen za trpezlivosť so stavbou elektromagnetu a jeho súčastí, ale aj za rady, pomoc a dochvilnosť pri problémoch s meraniami.

Obsah

Úvod	2
1 Teoretická časť	3
1.1 Magnetické pole	3
1.2 Elektromagnety	4
1.3 Hallov jav	5
2 Experimentálne usporiadanie	7
2.1 Elektromagnet	7
2.2 Mierky magnetického poľa	7
3 Princíp skenovania a kalibrácia	10
3.1 Skenovanie	10
3.2 Kalibrácia 3D hallovskej mierky	11
4 Výsledky merania	15
4.1 Základné konfigurácie	15
4.2 Oblasť homogenity	18
4.3 Závislosť veľkosti magnetického poľa na prúde	20
4.4 Otáčanie poľa	21
4.5 Hysterézia pri pevnom smere poľa I	23
4.6 Hysterézia pri pevnom smere poľa II	25
4.7 Diskusia nameraných výsledkov	27
Záver	28
Zoznam použitej literatúry	29
Zoznam obrázkov	30

Úvod

Vedným oborom, ktorý skúma spin elektrónu a jeho využitie je spintronika. Ku konštrukcii spintronických súčiastok sa využívajú tenké vrstvy zložené z feromagneticky usporiadaných látok. Magneto-optika je oborom, ktorý sa okrem iného zaoberá magnetickou charakterizáciou takýchto tenkých vrstiev využívajúc interakciu svetla s magneticky usporiadaným materiálom. Tento prístup dovoľuje skúmať magnetické a magneto-optické parametre študovaných vzoriek. Pri takýchto meraniach je nutné mať k dispozícii elektromagnet umožňujúci meniť smer poľa pri zachovaní jeho veľkosti.

Elektromagnet nachádzajúci sa v Laboratóriu OptoSpintroniky bol práve za účelom zachovávania veľkosti poľa pri jeho rotácii skonštruovaný. Táto práca sa zaoberá podrobnou charakterizáciou magnetických polí generovaných týmto elektromagnetom pri rôznych konfiguráciách prúdov tečúcich jeho cievkami, vplyvom hysterézie na tvar poľa a spoľahlivosťou elektromagnetu.

1. Teoretická časť

1.1 Magnetické pole ^[1]

Už v prvej polovici 19. storočia sa vedelo, že strelka kompasu sa vychýli v prítomnosti vodičov, ktorými prechádza prúd alebo určitých nerastov, ktoré sa medzi sebou nezanedbateľne priťahujú či odpudzujú. Dnes vieme, že tieto javy (a mnoho ďalších) možno popísať pomocou konceptu magnetického poľa, ktoré je spolu s elektrickým poľom plne popísané Maxwellovými rovnicami.

V dnešnej dobe využívame magnetické pole k veľkému množstvu vecí — od urýchľovania častíc na vysoké rýchlosti až po stabilizovanie antihmoty. Za zmienku stojí využívanie magnetického poľa v magneto-optike, ktorá skúma okrem iného magnetickú anizotropiu materiálov, čo môže mať v budúcnosti značný dôsledok na rozvoj elektroniky.

Základnou veličinou charakterizujúcou magnetické pole je magnetická indukcia \mathbf{B} s jednotkou *tesla* (T). Je obsiahnutá v troch Maxwellových rovniciach

$$\begin{aligned}\operatorname{rot}(\mu\mathbf{B}) - \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} &= \mathbf{j}, \\ \operatorname{rot}\mathbf{E} + \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} &= 0, \\ \operatorname{div}\mathbf{B} &= 0,\end{aligned}$$

kde μ je magnetická permeabilita, \mathbf{D} je elektrická indukcia, \mathbf{j} je hustota prúdu a t je čas.

Dôležitým vzťahom, ktorý priamo spája magnetickú indukciu a hustotu prúdu je *Biot-Savartov vzorec*

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}') \times \mathbf{R}}{R^3} dV',$$

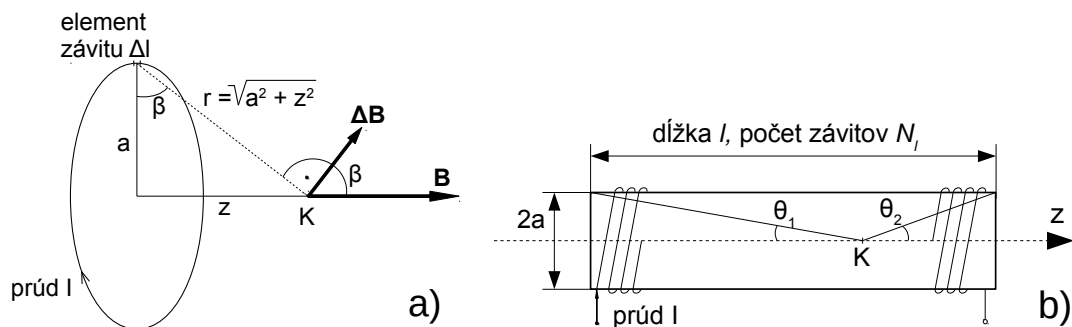
kde $\mathbf{R} \equiv \mathbf{r} - \mathbf{r}'$, μ_0 je permeabilita vákua, \times označuje vektorový súčin a integrácia prebieha cez objem V , v ktorom je $\mathbf{j}(\mathbf{r}') \neq \mathbf{0}$.

Vzťah medzi tokom magnetickej indukcie po uzavretej krivke a prúdom I uzavretým touto krivkou vyjadruje *Ampérov zákon*

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I.$$

Pomocou týchto vzťahov možno určiť veľkosť magnetickej indukcie na ose kruhového závitu a na ose solenoidu (v bode K ; pozri Obr. 1.1):

$$\begin{aligned}B &= \frac{\mu_0}{2} I \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}}, & \text{pre kruhový závit,} \\ B &= \frac{\mu_0}{2} I N_l (\cos \theta_1 + \cos \theta_2), & \text{pre solenoid.}\end{aligned}$$



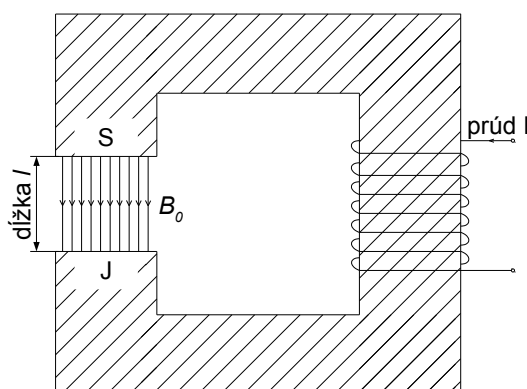
Obr. 1.1: a) Schéma kruhového závitu, b) schéma solenoidu

Vzťah pre veľkosť magnetickej indukcie na ose mimo solenoidu sa v prípade veľkej dĺžky l zjednodušuje na tvar

$$B = \mu_0 I N_l.$$

1.2 Elektromagnety [1]

V praxi je pri experimentoch často potrebné, aby bolo magnetické pole čo najviac homogénne. Užitočným nástrojom na vytvorenie takéhoto poľa sú elektromagnety (pozri Obr. 1.2), ktoré sú zložené z feromagnetického materiálu s vysokou relatívnou permeabilitou μ_r a cievky na ňom navinutej. Súčasťou je taktiež vzduchová medzera, práve v ktorej je pole v prvom priblížení homogénne. Realita je ale zväčša taká, že približnú homogenitu možno konštatovať iba v malej oblasti v strede vzduchovej medzery.



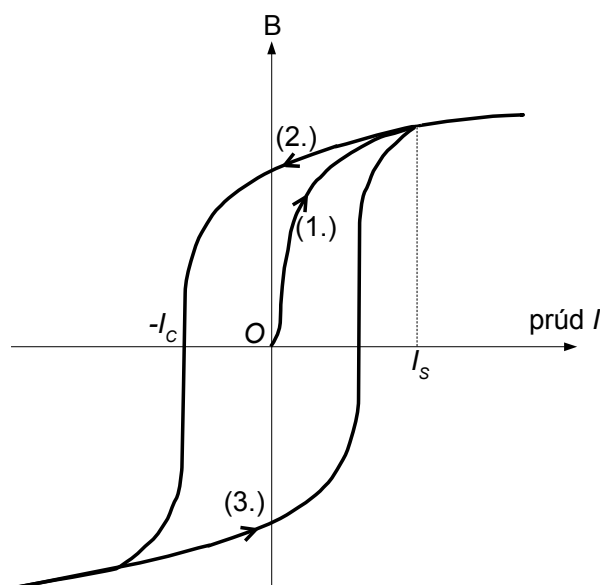
Obr. 1.2: Schéma elektromagnetu

V elektromagnetoch je možné meniť veľkosť magnetického poľa vo vzduchovej medzere pomocou zmeny veľkosti prúdu. Teoreticky by malo byť možné pomocou skombinovania dvoch takýchto elektromagnetov do polohy so spoločnou vzduchovou medzerou meniť nielen veľkosť magnetického poľa, no aj jeho smer [2].

Feromagnetické materiály, ktoré sa využívajú pri stavbách elektromagnetu majú vlastnosť vytvárať magnetické pole, pokiaľ sú sami doň vložené — čo je

vlastne princíp činnosti elektromagnetov. Platí však, že aj pokiaľ nie je feromagnetický materiál vystavený vonkajšiemu poľu, tak môže generovať magnetické pole. Tento jav súvisí s hysteréziou, ktorá popisuje odozvu materiálu na vonkajšie magnetické pole.

Predpokladajme, že máme feromagnetickú vzorku negenerujúcu magnetické pole vďaka tomu, že sa skladá z veľkého počtu rôzne orientovaných magnetických domén. Nech je vložená do dutiny cievky, ktorou neprechádza prúd (pozri Obr. 1.3, bod O). Pri zvyšovaní vonkajšieho poľa, čo docieľujeme zvyšovaním prúdu I (horizontálna os) tečúceho cievkou, narastá veľkosť magnetického poľa B (vertikálna os) budenej vzorkou, čo je znázornené tzv. *krivkou prvotného magnetovania* (úsek (1.)). Pri určitom prúde I_S je vzorka magneticky nasýtená a ďalšie zvyšovanie prúdu poľa má len malý vplyv na zvyšovanie magnetického poľa budenej vzorkou. Pri následnom znižovaní prúdu klesá magnetické pole pomalšie (úsek (2.)) a pri nulovom prúde vzorka budí magnetické pole nenulovej veľkosti. Pri otočení polaroty prúdu a zvyšovaní jeho veľkosti z nuly klesá magnetické pole vzorky, pričom pri určitom prúde $-I_C$ dosiahne nulovú hodnotu. Ďalšie zvyšovanie prúdu má za následok nárast magnetického poľa opačného smeru až do nasýtenia. Pri znižovaní prúdu klesá magnetické pole znova po inej krivke (úsek (3.)), nulovú hodnotu dosiahne až po otočení polaroty prúdu a jeho zvýšení a znova pri prúde I_S nastane nasýtenie. Ďalšie znižovanie prúdu by malo za následok zmenu magnetického poľa podľa krivky (2.). Táto uzavretá krivka sa nazýva *hysterézna slučka*.



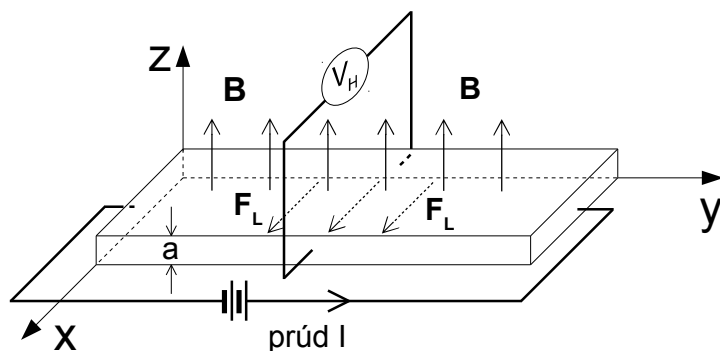
Obr. 1.3: Hysterézna slučka

1.3 Hallov jav [1]

Meranie magnetického poľa vykonávame pomocou magnetometrov. Mnoho z nich, používaných aj v dnešnej dobe, pracuje na princípe Hallovho javu.

Hallov jav nastáva polovodičoch (alebo aj v kovoch), ktoré sú napojené na zdroj jednosmerného prúdu I a sú vložené do magnetického poľa B (pozri

Obr. 1.4). Často majú tvar tenkej doštičky, ktorej hrúbku označme a a pre určitosť uvažujme, že vodivosť v nej zaručujú elektróny. Na elektróny pohybujúce sa doštičkou — v našom prípade v kladnom smere osi y — pôsobí Lorentzova sila \mathbf{F}_L v smere kolmom na smer toku elektrónov a na smer magnetickej indukcie, čo má za následok, že na jednej strane doštičky je elektrónov nadbytok, čím vzniká v smere osi x napätie. Takto vzniknuté napätie nazývame Hallovo napätie U_H .



Obr. 1.4: Hallov jav

Pre meranie magnetického poľa je podstatný vzťah medzi priemetom vektoru magnetickej indukcie \mathbf{B} do smeru normály k doštičke a Hallovým napätím U_H , ktorý má podobu

$$U_H = \frac{BR_H I}{a},$$

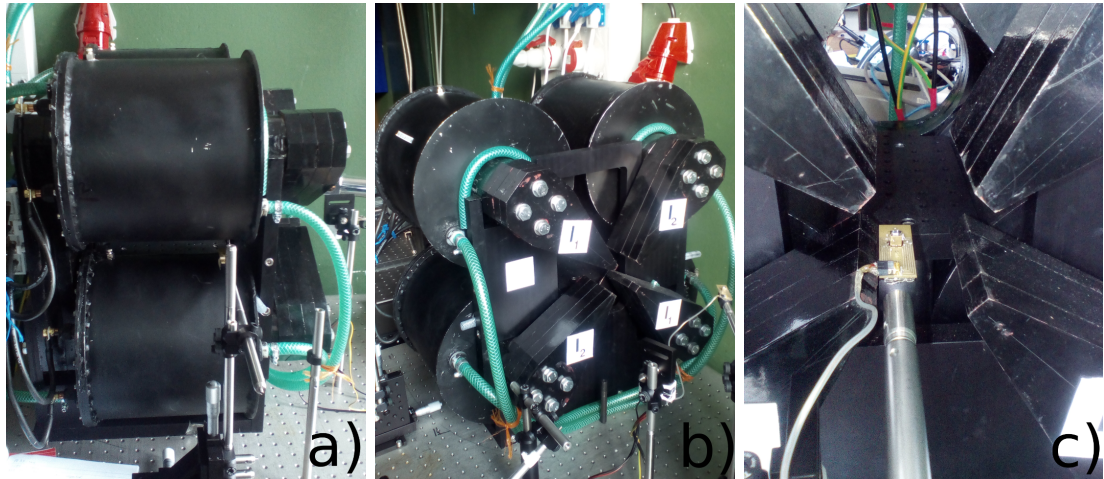
kde R_H je Hallova konštanta závislá od materiálu.

Je teda vidieť, že medzi veľkosťou magnetickej indukcie a Hallovým napätím, ktoré možno reálne merať voltmetrom existuje priama úmera. Táto skutočnosť sa využíva aj napr. pri kalibrovaní mierok.

2. Experimentálne usporiadanie

2.1 Elektromagnet

Magnetické pole, ktorého vlastnosti sme skúmali, bolo vytvárané prototypom elektromagnetu (pozri Obr. 2.1) z Laboratória OptoSpintroniky. Hlavnými komponentami tohoto elektromagnetu sú dva páry cievok, ktoré sú nezávislo jeden od druhého napájané jednosmerným prúdom, feromagnetické ramená, na ktorých sú cievky navinuté, pólové nadstavce, ktorými je magnetické pole usmernené do spoločnej vzduchovej medzery, a chladenie. Napájanie cievok sprostredkovali zdroje Kepco Power Supply BOP50-20GL. Stavba elektromagnetu bola inšpirovaná schémou elektromagnetu z článku [2], rozdiel je vo veľkosti — veľkosť napr. vzduchovej medzery elektromagnetu z [2] je približne polovičná v porovnaní so vzduchovou medzerou nami používaného elektromagnetu, čo je kvôli požiadavku na možnosť vloženia vzorky umiestnenej v kryostate. Celkovo bol elektromagnet postavený vo väčšej veľkosti.



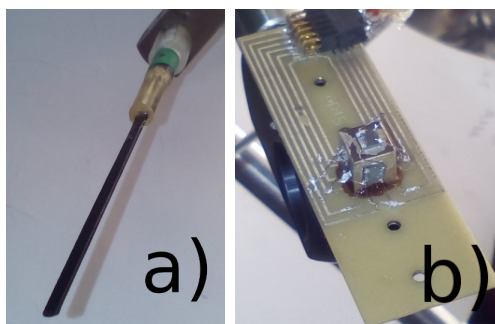
Obr. 2.1: Používaný elektromagnet; a) pohľad z boku, b) celkový pohľad, c) oblasť predpokladanej homogenity spolu s mierkou

Teoreticky by takto zostavený elektromagnet mal vo svojej vzduchovej medzere vytvárať relatívne silné a homogénne magnetické pole a správnymi kombináciami prúdov prechádzajúcich cievkami by malo byť možné vytvoriť polia s rovnakou veľkosťou a rôznymi smermi, čo možno využiť pre magneto-optickú detekciu hysteréznych slučiek [3].

2.2 Mierky magnetického poľa [4]

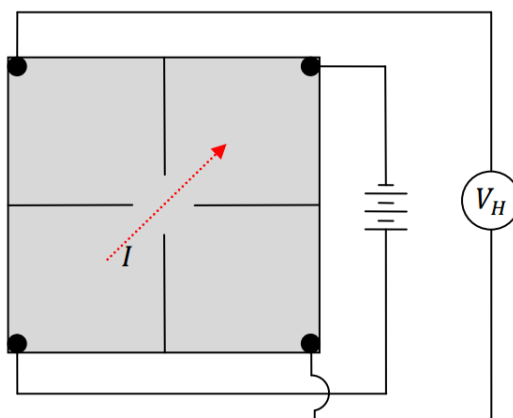
Na skenovanie magnetického poľa sme používali 2 mierky - jednu komerčne vyrobenú (pozri Obr. 2.2 a)) pre meranie veľkosti magnetického poľa v jednom smere, ktorú budeme označovať ako *komerčná mierka*. A ďalej jednu vyrobenú pre meranie veľkosti magnetického poľa v troch na seba navzájom kolmých smeroch (pozri Obr. 2.2 b)), ktorú budeme nazývať *3D hallovská mierka*. Obe pracujú na princípe Hallovho javu (pozri 1.3 *Hallov jav*).

Podrobný popis 3D hallovskej mierky možno nájsť v Správe študentského projektu [4], nakoľko v ňom bola táto konkrétna mierka bola použitá k meraniu, a preto tu o nej uvedieme len základné informácie.



Obr. 2.2: Hallovské mierky: a) komerčná mierka, b) 3D hallovská mierka

3D hallovská mierka pozostáva z kocky s hranou dlhou 6 mm, troch polovodičových magnetických senzorov (pozri Obr. 2.3), ktoré sú umiestnené na jej stenách a spojov. Sériové zapojenie vrcholov zabezpečuje, že nimi tečú prúdy rovnakých veľkostí. Rozmery aktívnej plochy senzorov, t.j. oblasti senzorov, ktorá je citlivá na magnetické pole, sú približne $0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$.

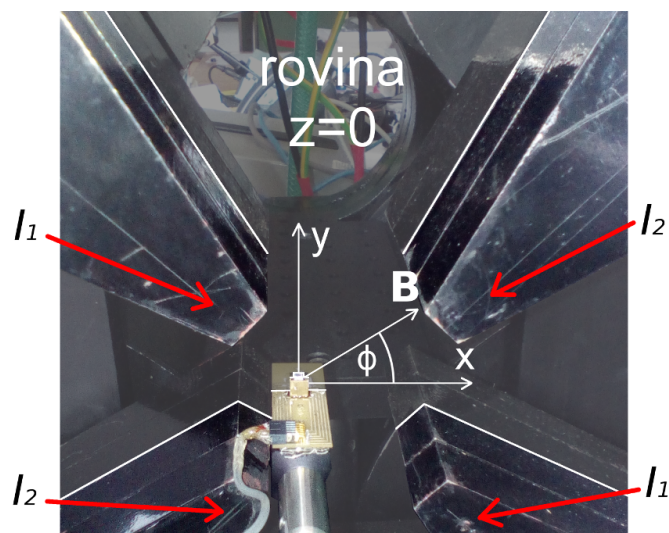


Obr. 2.3: Schéma polovodičového magnetického senzora [4]

V meranej oblasti medzi pólovými nadstavcami sme si zvolili pravotočivú súradnicovú sústavu (x, y, z) tak, aby rovina symetrie daná pólovými nadstavcami ležala v rovine $z = 0$, os x smerovala vodorovne a os y zvislo nahor (pozri Obr. 2.4).

Senzory sme označili písmenami X , Y a Z podľa toho, ktorý z priemetov B_x , B_y , B_z magnetickej indukcie \mathbf{B} zaznamenávali v nami zvolenej súradnicovej sústave, t.j. senzor X pre zložku B_x atď.

Nakoľko sme už definovali súradnicové osi, označili sme prúd, ktorým sú napájané cievky odpovedajúce pólovým nadstavcom v druhom a štvrtom, resp. prvom a treťom kvadrante ako I_1 , resp. ako I_2 (pozri Obr. 2.4). V súlade s týmto budeme v grafoch pomocou označení I_1 a I_2 znázorňovať polohu pólových nadstavcov odpovedajúcich prúdom I_1 a I_2 .



Obr. 2.4: Zvolené súradnicové osi

Smer poľa budeme charakterizovať uhlom ϕ medzi vektorom magnetickej indukcie \mathbf{B} a x -ovou osou. Uhol budeme označovať za kladný, ak prechod od x -ovej osi k vektoru \mathbf{B} je proti smeru chodu hodinových ručičiek (t.j. uhol ϕ na Obr. 2.4 je kladný). Analogicky pre záporné uhly. Vo väčšine prípadov sa obmedzíme na znázorňovanie smeru poľa pomocou kladných uhlov, v niektorých prípadoch je však názornejšie použiť aj uhly záporné.

Z rozmerových dôvodov nebolo možné 3D hallovskou mierkou premeriavať magnetické pole v celej vzduchovej medzere, no iba v oblasti s rozmermi približne $2,1 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$. Kvôli vzájomnému posunu senzorov X a Y je však oblasť, ktorú možno skenovať ešte menšia — konkrétne $x \in [3 \text{ mm}; 21 \text{ mm}]$, $y \in [3 \text{ mm}; 24 \text{ mm}]$ (3 mm, ktoré sú v oboch prípadoch začiatkom intervalu priamo súvisia s polovičnou veľkosťou kocky mierky, na ktorej sú senzory).

3D hallovskú mierku sme napájali jednosmerným prúdom pomocou zdroja Keithley 2634B a hodnoty Hallových napätí na senzoroch X a Y sme merali pomocou voltmetrov Keithley 2000 Multimeter. Po celý čas merania sme mierkou púšťali rovnaký prúd, konkrétne $100 \mu\text{A}$ s chybou menšou než 1 %.

Nami používanou komerčnou mierkou je možné merať iba jeden priemet poľa, nakoľko obsahuje iba jeden senzor. Na druhú stranu je však pravdepodobné, že hodnoty namerané komerčnou mierkou odpovedajú skutočnosti viac než tie, ktoré sú namerané 3D hallovskou mierkou (resp. odpovedajúca chyba merania je menšia).

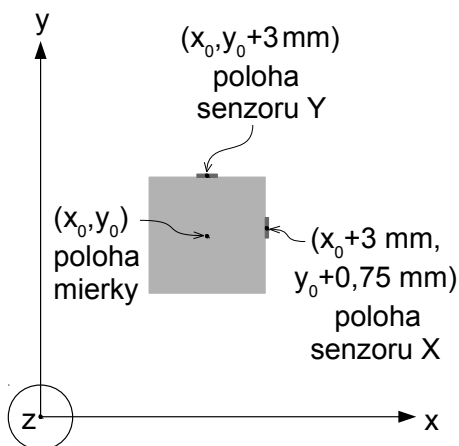
3. Princíp skenovania a kalibrácia

3.1 Skenovanie

Nakoľko prebiehali všetky skenovania v rovine $z = 0$, tak k popisu polohy mierky nám vystačili súradnice x a y . Kvôli faktu, že senzory X a Y nameriavali pri danej polohe mierky priemety B_x a B_y v rôznych bodoch, bolo nutné zvoliť krok posunu mierky tak, aby sa body nameraných priemetov prekryli. Túto požiadavku splňuje ľubovoľný krok, ktorého dĺžka je celočíselným deliteľom polovičnej veľkosti hrany kocky. Aby sme taktiež mali relatívne vysokú hustotu bodov vyplňujúcich meranú oblasť, zvolili sme krok s dĺžkou 0,75 mm.

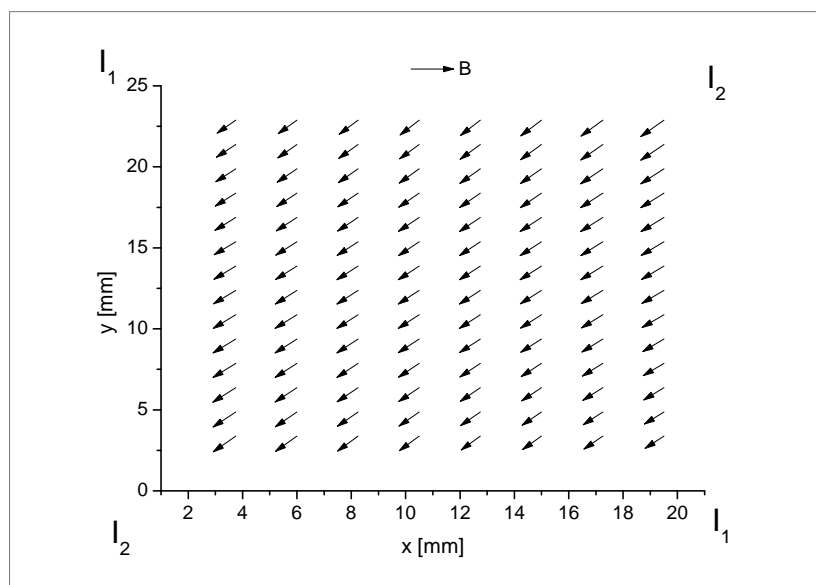
Merania sme vykonávali prostredníctvom počítačom riadenej zmeny polohy mierky, konkrétne pomocou 3-dimenzionálneho posunu (MT3/M-Z8 Thorlabs) s minimálnym možným krokom 29 nm.

Korekciu na relatívnu polohu senzorov X a Y voči polohe mierky, za ktorú sme stanovili geometrický stred kocky, sme vyriešili prirátaním polovičnej veľkosti hrany kocky k odpovedajúcim súradniciam (pozri Obr. 3.1). Dôvod, prečo sme navyše k y -ovej súradnici senzoru X prirátali 0,75 mm súvisí s asymetriou nalepenia senzorov na kocku. Veľkosť tejto korekcie sme určili odhadom.

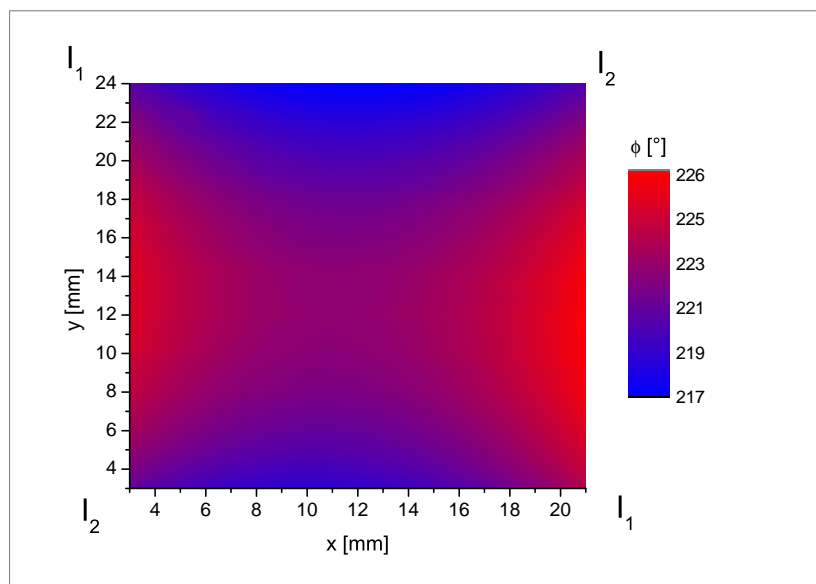


Obr. 3.1: Korekcia súradníc polôh senzorov X a Y voči polohe mierky

Pri skenovaní sme vždy obdržali sadu dát, ktorá obsahovala x -ovú a y -ovú súradnicu polohy mierky a jej odpovedajúci x -ový a y -ový priemet magnetickej indukcie. Keďže je vhodné namerané dáta spracovať do podoby čo najviac znázorňujúcej skutočnosť, rozhodli sme sa ich vykresľovať pomocou tzv. mapových grafov. Mohlo by sa zdať, že tento postup je vhodný pre znázornenie veľkosti poľa a pre smer poľa by bolo lepšie zvoliť vektorový graf (pozri Obr. 3.2). Je však vidieť, že v takomto grafe je ťažké určiť ako veľmi je pole homogénne z hľadiska zmeny smeru. Naopak pri znázornení smeru toho istého poľa pomocou mapového grafu (pozri Obr. 3.3) — v ktorom znázorňujeme smer ako uhol medzi smerom vektora magnetickej indukcie a kladným smerom osi x — je jasne vidieť ako veľmi je pole homogénne.



Obr. 3.2: Znázornenie smeru magnetického poľa pomocou vektorov



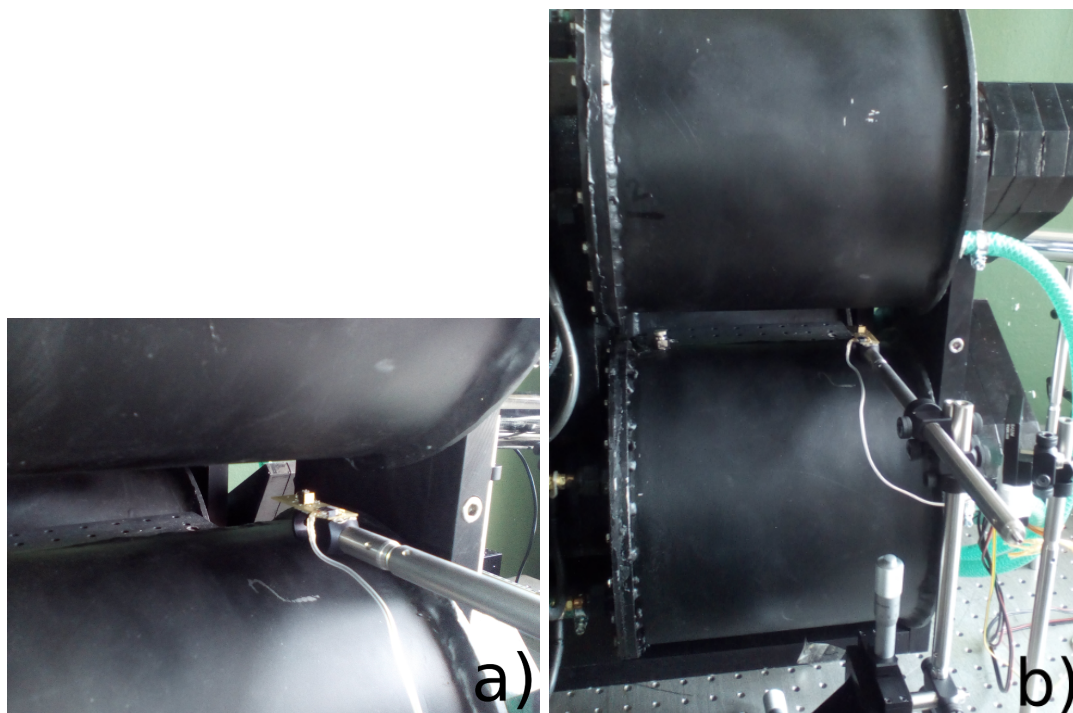
Obr. 3.3: Znázornenie smeru magnetického poľa pomocou mapového grafu

3.2 Kalibrácia 3D hallovskej mierky

Keďže nebolo známe akým hodnotám veľkosti magnetickej indukcie B odpovedajú hodnoty Hallovhovho napätia U_H , bolo potrebné 3D hallovskú mierku na kalibrovať. Na kalibráciu sme využili časť elektromagnetu medzi cievkami (pozri Obr. 3.4), v ktorej bolo magnetické pole dostatočne homogénne, čo sme overili komerčnou mierkou.

Nakoľko sme ani pri jednom meraní nepotrebovali z -ový priemet magnetickej indukcie, kalibrovali sme iba senzory X a Y .

Pri kalibrácii sme postupovali nasledovne: mierku sme nastavili medzi cievky tak, aby senzor Y bol vodorovne (t.j. ako na Obr. 3.4) a v určitom mieste — označme ho M — a pri štyroch rôznych prúdoch $I_1 = I_2 = -20\text{ A}, -10\text{ A}, 10\text{ A}, 20\text{ A}$



Obr. 3.4: Časť elektromagnetu medzi cievkami použitá na kalibrovanie mierky; a) detailnejší pohľad, b) pohľad z diaľky

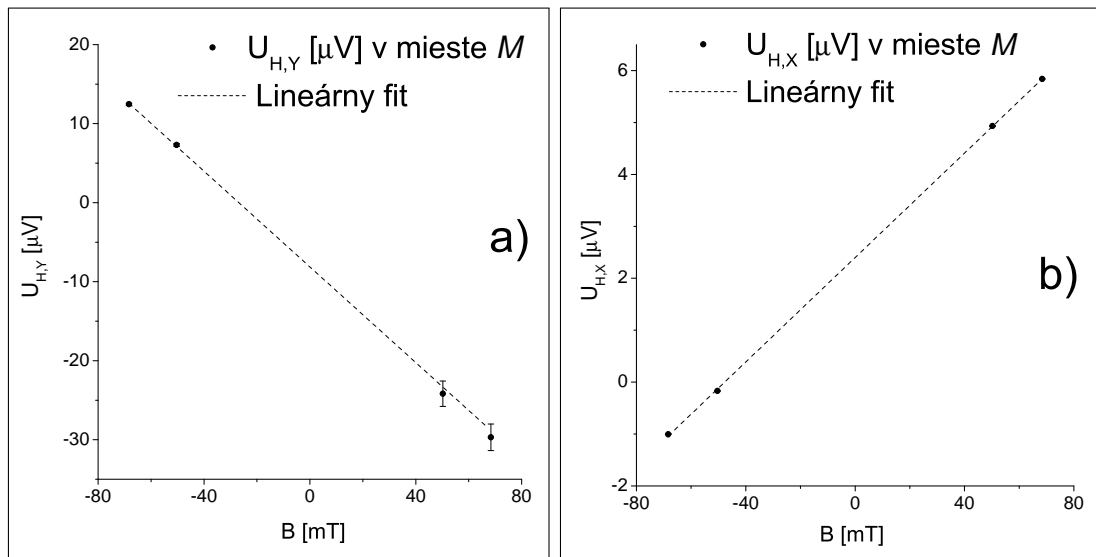
sme zmerali Hallovo napätie $U_{H,Y}$ na senzore Y . Mierku sme otočili o 90° a presunuli tak, aby bol vodorovne senzor X a jeho poloha v mieste M a zmerali sme 4 hodnoty $U_{H,X}$. Ku kalibrácii sme taktiež potrebovali vedieť veľkosti magnetickej indukcie B v bode M , ktoré odpovedali štyrom rôznym prúdom prechádzajúcich cievkami. Tie sme získali pomocou komerčnej mierky. Nakoľko bolo obtiažne nastaviť polohu komerčnej mierky presne, zaznamenali sme si chyby hodnôt magnetickej indukcie z intervalu hodnôt, ktorý sme pri odčítaní hodnôt z komerčnej mierky obdržali. Veľkosť týchto chýb bola vo všetkých prípadoch menšia ako 1 %. Malou chybou (cca 1 mm) bolo zaťaženie nastavenie mierky tak, aby bol senzor X po otočení mierky o 90° a posunutý v rovnakom mieste, v ktorom bol senzor Y . To sme zahrnuli v chybe $U_{H,Y}$, resp. $U_{H,X}$, ktorú sme stanovili ako priemernú hodnotu rozdielu medzi hodnotami $U_{H,Y}$, resp. $U_{H,X}$ nameranými v mieste kalibrácie a v miestach o 1 mm vyššie a nižšie. Tento celý postup sme zopakovali pre druhý bod, vzdialený o 1 cm vodorovne od bodu M , ktorý označme ako N .

Z nameraných hodnôt sme vytvorili závislosti U_H na B , ktoré sme v programe OriginPro 8.5 nafitovali funkciou $y(x) = a + b \cdot x$, kde a a b sú regresné koeficienty, pričom sme vzali do úvahy chyby jednotlivých hodnôt a závislosti sme vykreslili do grafov (pozri Obr. 3.5 a Obr. 3.6).

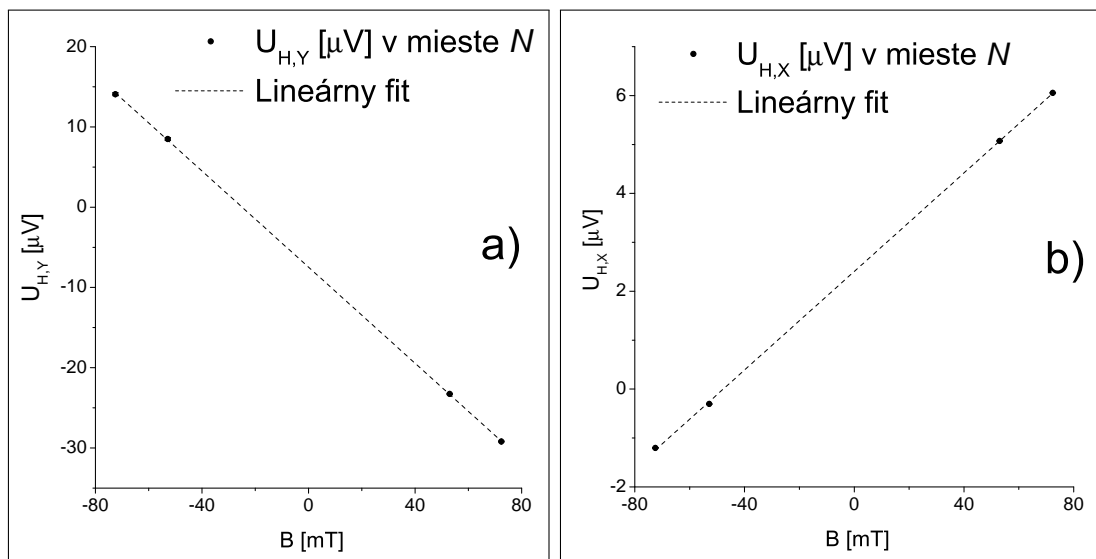
Získali sme tak hodnoty a chyby regresných koeficientov pre senzory X a Y , z ktorých sme určili výsledné kalibračné hodnoty:

$$\left. \begin{aligned} a_y &= -(7,8 \pm 0,3) \mu V \\ b_y &= -(3,01 \pm 0,04) \cdot 10^{-4} \end{aligned} \right\} \quad \text{senzor } Y,$$

$$\left. \begin{aligned} a_x &= (2,40 \pm 0,02) \mu V \\ b_x &= (5,03 \pm 0,05) \cdot 10^{-5} \end{aligned} \right\} \text{senzor } X.$$



Obr. 3.5: Nameraná závislosť Hallovhho napätia na magnetickej indukcii v mieste M; a) senzor Y, b) senzor X



Obr. 3.6: Nameraná závislosť Hallovhho napätia na magnetickej indukcii v mieste N; a) senzor Y, b) senzor X

Z kalibračných hodnôt sme pri výpočtoch magnetickej indukcie počítali aj ich chyby u_{B_x} a u_{B_y} , konkrétne podľa vzťahu pre výpočet chyby nepriameho merania [5], ktorý má v našom prípade podobu

$$u_{B_x} = \bar{B}_x \sqrt{\frac{u_{a_x}^2}{(u_{H_x} - \bar{a}_x)^2} + \frac{u_{b_x}^2}{\bar{b}_x^2}}, \quad (3.1)$$

kde u_{a_x} je chyba kalibračnej hodnoty a_x , t.j. $a_x = \bar{a}_x \pm u_{a_x}$ a podobne pre u_{b_x} a \bar{b}_x , \bar{B}_x je vypočítaná hodnota x -ového priemetu magnetickej indukcie a u_{H_x} je namerané Hallovo napätie na senzore X . Analogicky pre u_{B_y} . Vzťah pre výpočet chyby u_ϕ sme určili podobne:

$$u_\phi = \frac{1}{\bar{B}^2} \sqrt{(\bar{B}_y^2 u_{B_x})^2 + (\bar{B}_x u_{B_y})^2}, \quad (3.2)$$

kde \bar{B} je hodnota vypočítanej magnetickej indukcie.

Všetky namerané dáta sme teda podľa (nezaokrúhlených) kalibračných hodnôt korigovali a pokiaľ nebude špecifikované inak, budeme pod pojmom *dáta* mieniť *skorigované dáta*.

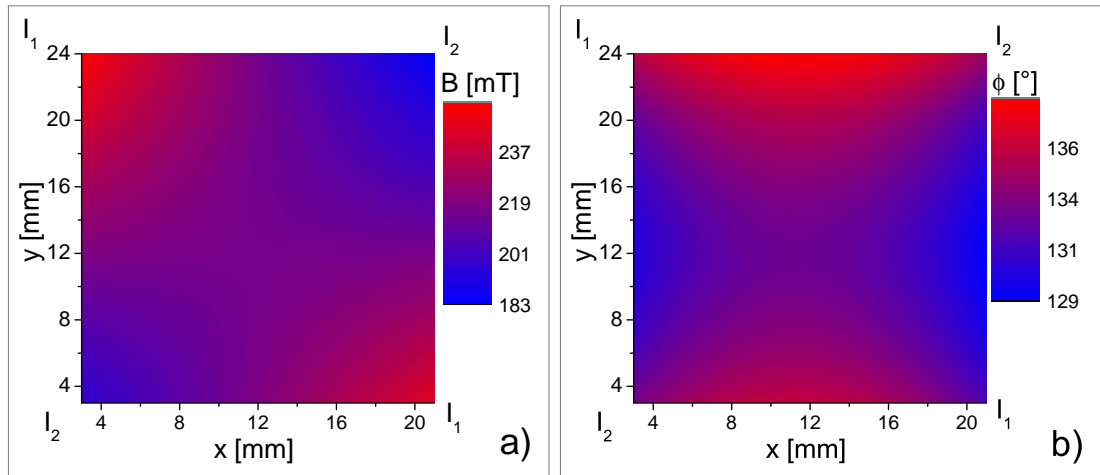
4. Výsledky merania

4.1 Základné konfigurácie

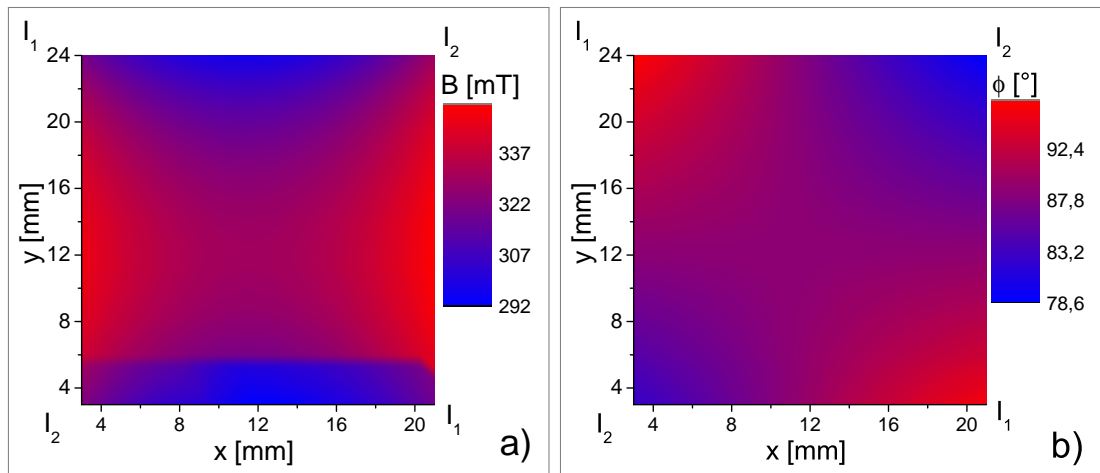
Nakoľko nám nebolo známe aké magnetické pole zostavený elektromagnet vytvára, bolo prvým krokom zoskenovanie meranej oblasti pri základných konfiguráciách prúdov. Zvolili sme kombinácie

- $I_1 = 20 \text{ A}$, $I_2 = 0 \text{ A}$,
- $I_1 = 20 \text{ A}$, $I_2 = 20 \text{ A}$,
- $I_1 = 0 \text{ A}$, $I_2 = 0 \text{ A}$,
- $I_1 = -20 \text{ A}$, $I_2 = 20 \text{ A}$

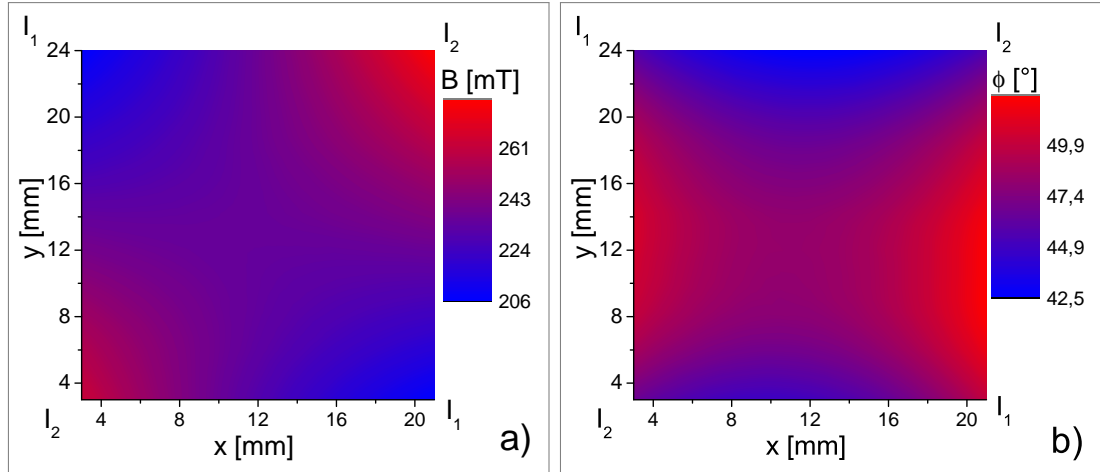
a namerané výsledky sme zakreslili do grafov (pozri Obr. 4.1 až Obr. 4.4).



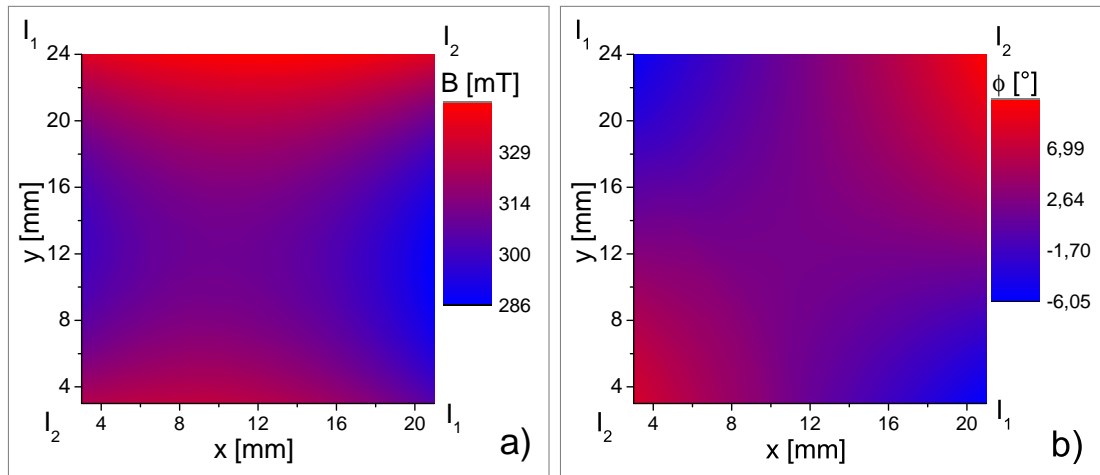
Obr. 4.1: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = 20 \text{ A}$, $I_2 = 0 \text{ A}$; a) veľkosť, b) smer



Obr. 4.2: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = 20 \text{ A}$, $I_2 = 20 \text{ A}$; a) veľkosť, b) smer



Obr. 4.3: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = 0$ A, $I_2 = 20$ A; a) veľkosť, b) smer

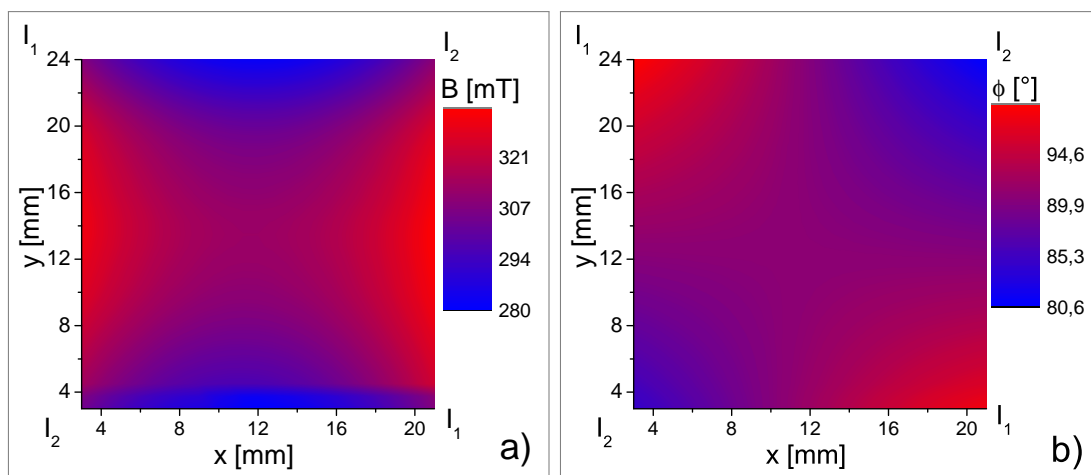


Obr. 4.4: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = -20$ A, $I_2 = 0$ A; a) veľkosť, b) smer

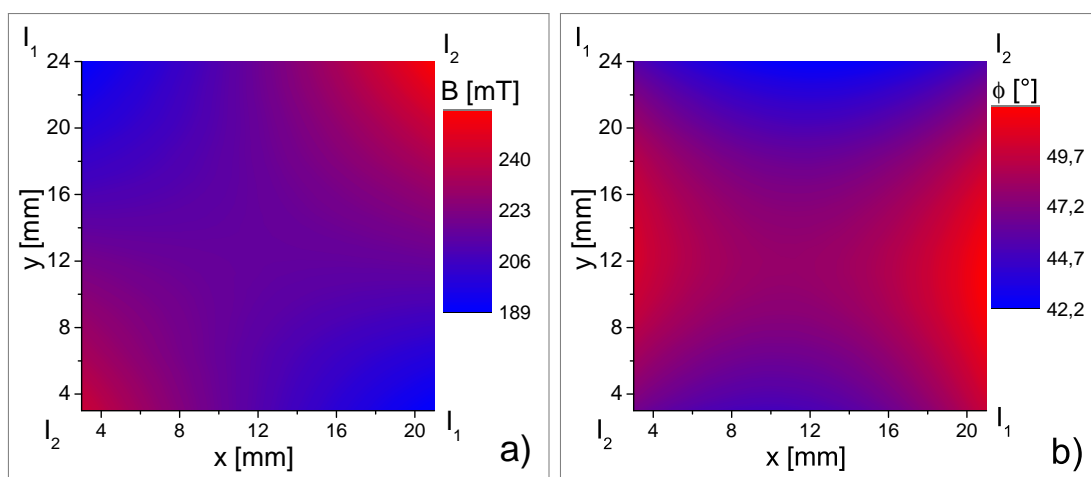
Pozn.1: V grafe veľkosti magnetickej indukcie pre prúdy $I_1 = 20$ A, $I_2 = 20$ A (Obr. 4.2 a)) je v spodnej časti vidieť vodorovný pás viditeľne sa odlišujúci farbou. To s veľkou pravdepodobnosťou súvisí s 3D hallovskou mierkou, ktorej výstup bol na začiatku merania — ktorému odpovedá spomenutý pás — ovplyvnený neznámym faktorom. Reálny priebeh magnetického poľa je v tejto oblasti s určitou viac hladký.

Pozn.2: Pre zjednodušenie budeme niekedy namiesto $I_1 = -20$ A, $I_2 = 20$ A písať iba skrátene $(-20$ A; 20 A) a pod.

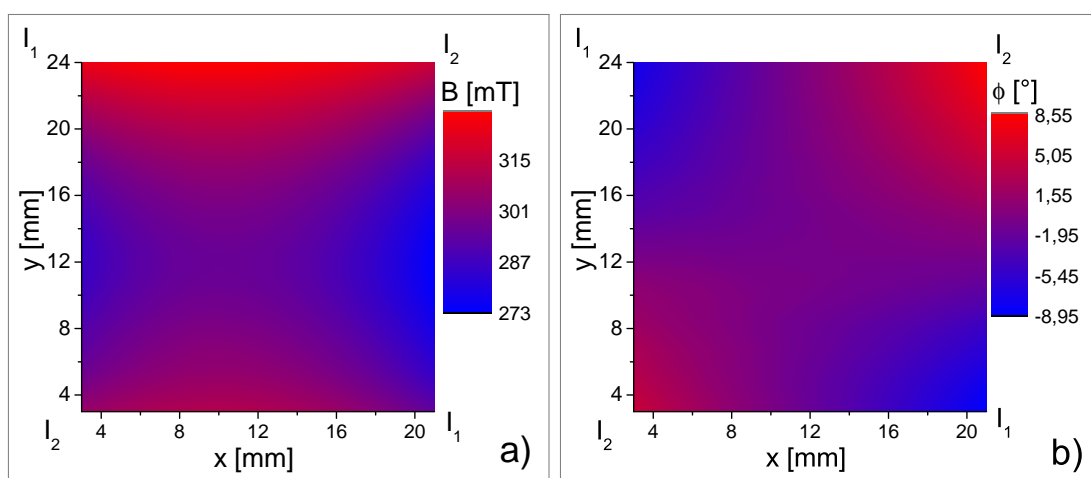
Je aspoň približne vidieť, že v bodoch symetrie je v prípade konfigurácie $(0$ A; 20 A) magnetické pole silnejšie než v prípade konfigurácie $(20$ A; 0 A) aj napriek tomu, že veľkosti prúdov tečúcich cievkami sú rovnaké. Rozdiel veľkosti magnetickej indukcie je približne 20 mT. Preto sme vykonali ďalšie merania, pri ktorých sme prúd I_2 znižovali, až pokiaľ sme nezískali približne rovnaké hodnoty v bodoch symetrie. Nájdeným prúdom bol $I_2 = 16$ A. Ten sme tak použili v ďalších konfiguráciách a namerané dáta sme zobrazili do grafov (pozri Obr. 4.5 až Obr. 4.7).



Obr. 4.5: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = 20$ A, $I_2 = 16$ A; a) veľkosť, b) smer



Obr. 4.6: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = 0$ A, $I_2 = 16$ A; a) veľkosť, b) smer



Obr. 4.7: Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 = -20$ A, $I_2 = 16$ A; a) veľkosť, b) smer

Chyby nameraných hodnôt sú v celých oblastiach skenovania približne rovnaké, konkrétne

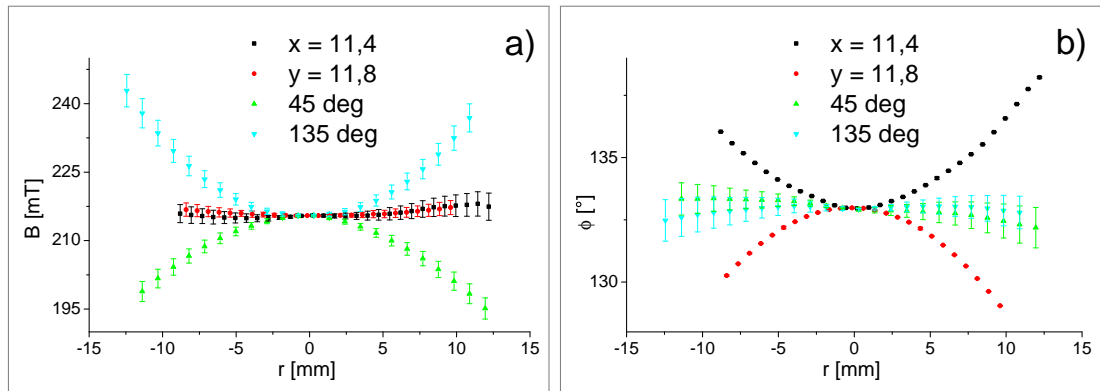
- $u_B = 4 \text{ mT}$, $u_\phi = 1^\circ \leftrightarrow (20 \text{ A}; 0 \text{ A})$,
- $u_B = 8 \text{ mT}$, $u_\phi = 1^\circ \leftrightarrow (20 \text{ A}; 16 \text{ A})$,
- $u_B = 4 \text{ mT}$, $u_\phi = 1^\circ \leftrightarrow (0 \text{ A}; 16 \text{ A})$,
- $u_B = 1 \text{ mT}$, $u_\phi = 3^\circ \leftrightarrow (-20 \text{ A}; 16 \text{ A})$.

V chybách u_ϕ nie sú zahrnuté neistoty spojené s nepresným natočením mierky či samotnou konštrukciou mierky. Vplyv týchto faktorov by sa mal vyjasniť v nasledujúcej časti.

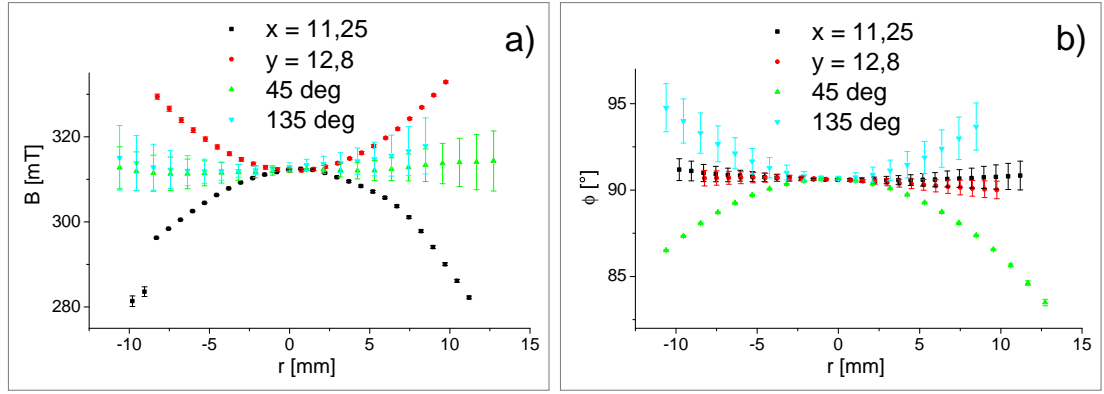
4.2 Oblasť homogenity

Z praktických dôvodov je nutné vedieť aká veľká je oblasť, v ktorej sa pole nemení, alebo mení len málo. Z mapových grafov sa veľkosť tejto oblasti určuje relatívne obtiažne, preto sme pre znázornenie zmeny poľa vytvorili po vzore [6] časť 6.2 Meranie magnetického poľa grafy (pozri Obr. 4.8 až Obr. 4.11), v ktorých sú zakreslené veľkosti poľa a smery poľa v štyroch rezoch meranej oblasti prechádzajúcich bodom symetrie v závislosti od vzdialenosti r od bodu symetrie (bodom so zápornou vzdialenosťou r od bodu symetrie je mienený bod vzdialený o r presne v opačnom smere oproti bodu s kladnou vzdialenosťou r). Súradnice bodu symetrie sme určili nasledovne: z mapového grafu veľkosti indukcie sme čo najpresnejšie určili stred symetrie veľkosti indukcie; podobne sme určili stred symetrie smeru indukcie; bod nachádzajúci sa uprostred sme stanovili ako výsledný bod symetrie, ktorý označme ako $(x_0; y_0)$. Meranou oblasťou sme viedli rezy pre

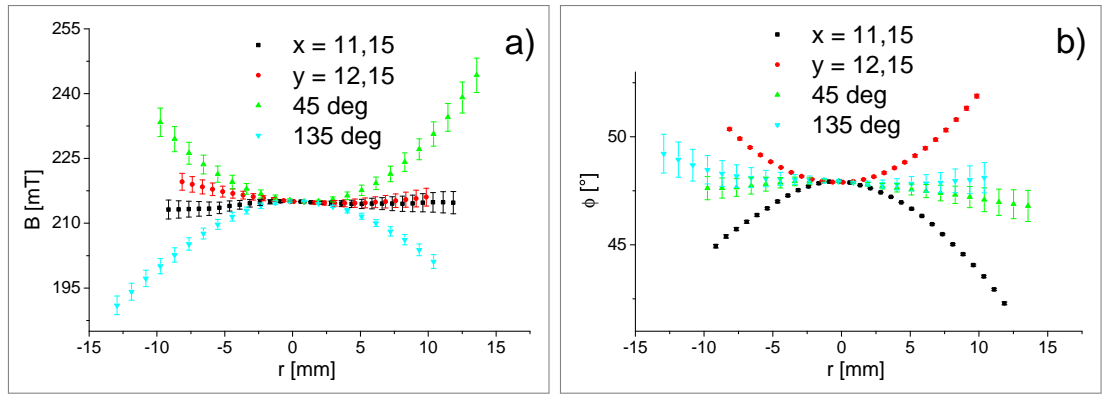
- $x = x_0$,
- $y = y_0$,
- $x - y = x_0 - y_0$, t.j. os 1. a 3. kvadrantu (v grafoch označené ako 45 deg),
- $x + y = x_0 + y_0$, t.j. os 2. a 4. kvadrantu (v grafoch označené ako 135 deg).



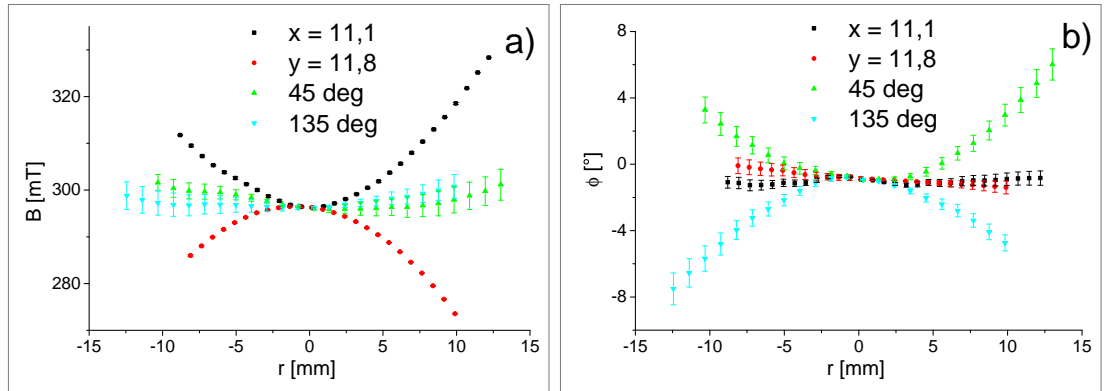
Obr. 4.8: Rezy meranou oblasťou vedené bodom symetrie (11,4 mm; 11,8 mm) odpovedajúce prúdom $I_1 = 20 \text{ A}$, $I_2 = 0 \text{ A}$; a) veľkosť poľa, b) smer poľa



Obr. 4.9: Rezy meranou oblasťou vedené bodom symetrie (11,25 mm; 12,8 mm) odpovedajúce prúdom $I_1 = 20$ A, $I_2 = 16$ A; a) veľkosť poľa, b) smer poľa



Obr. 4.10: Rezy meranou oblasťou vedené bodom symetrie (11,15 mm; 12,15 mm) odpovedajúce prúdom $I_1 = 0$ A, $I_2 = 16$ A; a) veľkosť poľa, b) smer poľa



Obr. 4.11: Rezy meranou oblasťou vedené bodom symetrie (11,1 mm; 11,8 mm) odpovedajúce prúdom $I_1 = -20$ A, $I_2 = 16$ A; a) veľkosť poľa, b) smer poľa

Pozn. ku grafom: Chybové úsečky reprezentujú fakt, že máme iba diskrétnu rozloženie bodov, ktorými popisujeme meranú oblasť. Pre vykreslenie vertikálneho rezu bodom napr. (11,4 mm; 11,8 mm), t.j. pre $x = 11,4$ mm, bolo nutné uvažovať rezy pre $x = 11,25$ mm a $x = 12$ mm. Hodnoty im odpovedajúce sme spriemerovali a chybu sme určili ako ich smerodajnú odchýlku. V niektorých prípadoch sme do úvahy vzali tri susedné rezy. Analogicky sme postupovali v prípade

horizontálneho a šikmých rezov. Do veľkostí chybových úsečiek sme nezapočítali samotné chyby magnetickej indukcie u_B , nakoľko našim účelom bolo zistiť ako veľmi je pole homogénne. Keďže sú smerodajné odchýlky v bodoch symetrie a ich okolí takmer nulové, reálne chyby v tejto oblasti sú rovné chybám u_B (pozri 4.1 *Základné konfigurácie*, na konci).

Vidíme, že niektoré grafy zobrazujúce priebeh smeru neodpovedajú predpokladaným hodnotám — namerali sme 133° namiesto 135° a $47,5^\circ$ namiesto 45° , čo nie je ani v rozmedzí chýb. Tieto rozdiely sú pravdepodobne spôsobené chybou 3D hallovskej mierky alebo jej konštrukciou, nakoľko nalepiť senzory mierky tak, aby boli na seba presne kolmo je obtiažne. Odchýlku môže taktiež spôsobiť nesprávne natočenie mierky ako celku. Keďže predpokladáme, že namerané hodnoty by mali byť presne 135° , resp. 45° , stanovujeme chybu nameraných hodnôt uhlov na $u_\phi = 3^\circ$.

Namerané dáta ukazujú, že v oblasti veľkej $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ so stredom v bodoch symetrie sa vo všetkých prípadoch mení veľkosť magnetickej indukcie o menej než 5 mT , čo je pri tam nameraných hodnotách rozdiel menší než 3% , a smer magnetickej indukcie o menej než 3° .

Tiež je vidieť, že síce je bod symetrie pri rôznych poliach v rôznych miestach, približne si udržiava polohu v okolí (11 mm ; 12 mm). Jednotlivé namerané výkyvy môžu byť spôsobené opäť používanou 3D hallovskou mierkou (pozri kapitolu 4.7 *Diskusia nameraných výsledkov*).

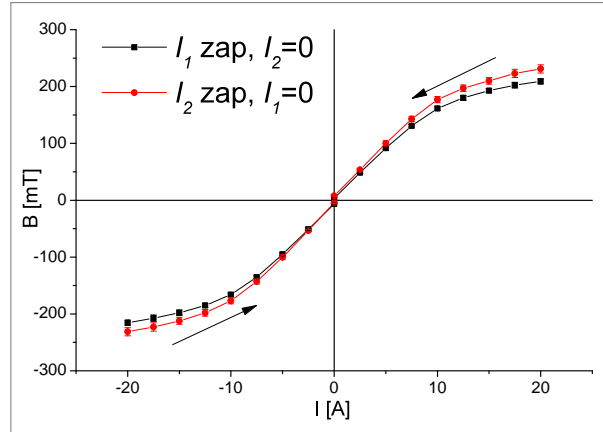
4.3 Závislosť veľkosti magnetického poľa na prúde

V ďalšej časti merania sme sa zaoberali závislosťou veľkosti poľa od prúdov prechádzajúcich cievkami. Obmedzili sme sa zatiaľ na najjednoduchší prípad, kedy sme prúd púšťali vždy iba jedným párom cievok a neskúmali sme pri tom jav hysterézie podrobne, t.j. prúd sme nemenili cyklicky a rovnomerne.

Prúd prvým párom sme teda nastavili na nulu a druhým maximálny, t.j. (0 A ; 20 A), rovnomerne sme I_2 znižovali do nuly a z dát sme určili veľkosti poľa v bodoch symetrie. Potom sme polaritu prúdu I_2 otočili, nastavili veľkosť na maximum, t.j. na (0 A ; -20 A), znova sme ju začali rovnomerne znižovať a z dát sme určovali veľkosti poľa. Rovnaký postup sme zopakovali aj pre zámenu $I_1 \leftrightarrow I_2$ a namerané dáta sme zobrazili do grafu (pozri Obr. 4.12), v ktorom sme body pospájali pre zvýraznenie závislosti.

Z časových dôvodov sme nepremiavali celú oblasť vzduchovej medzery, no iba menšiu časť s rozmermi približne $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ so stredom v bode cca (12 mm ; 12 mm). Chyby nameraných hodnôt u_B sme stanovili z chýb získaných výpočtom B z Hallových napätí podľa vzťahu 3.1, ktoré označme ako $u_{B,b}$ a z chýb u_B' určených ako rozdiel maximálnej a minimálnej nameranej hodnoty v meranej oblasti pri daných prúdoch (to z dôvodu, že pri malých prúdoch bolo zväčša nemožné stanoviť súradnice bodu symetrie a teda ani hodnoty B v bode symetrie) podľa vzťahu [5]

$$u_B = \sqrt{u_{B,b}^2 + u_B'^2}.$$



Obr. 4.12: Priebeh veľkosti magnetického poľa v závislosti od prúdov prechádzajúcich cievkami. Šípky znázorňujú smer zmeny prúdu

Z grafu je zrejmé, že pri rovnakých hodnotách a orientáciách prúdov je pole väčšie, ak je budené prúdom I_2 , čo súhlasí s tým, že v prvej časti merania (pozri 4.1 *Základné konfigurácie*) sme museli prúd I_2 znížiť pre dosiahnutie rovnakej veľkosti poľa.

Pri detailom pohľade by sme však videli, že veľkosť poľa (t.j. $|\mathbf{B}|$) je v prípade (20 A; 0 A) odlišná od veľkosti poľa pri prúdoch (−20 A; 0 A) o cca 5 mT, čo je v rámci chyby. Predpokladáme však, že veľkosť poľa je — ak sa pohybujeme po správnej vetve hysteréznej slučky — pri opačne orientovaných prúdoch rovnaká (čo sme si neskôr aj overili pomocou komerčnej mierky v časti 4.6 *Hysterézia pri pevnom smere poľa II*).

Aby sme sa pri stanovovaní prúdov k dosiahnutiu určitej veľkosti magnetického poľa čo najviac priblížili skutočnosti, uvažovali sme v ďalších častiach spriemerovaný priebeh veľkosti magnetického poľa, v ktorom odpovedá prechodu od B k $-B$ prechod od I_1 k $-I_1$, resp. od I_2 k $-I_2$. Takýto priebeh veľkosti magnetického poľa v závislosti od prúdu sa od pôvodného líši len nepatrne.

4.4 Otáčanie poľa

Ďalšia vlastnosť elektromagnetu, ktorú sme skúmali, bola schopnosť otáčať smer magnetického poľa pri zachovaní jeho veľkosti. Predpokladajúc, že prúdy (0 A; 16 A) odpovedajú v bode symetrie smeru poľa $\phi = 45^\circ$ a prúdy (20 A; 0 A) smeru $\phi = 135^\circ$, malo by byť teoreticky možné pomocou súčtu vektorov a znalosti závislosti B od I_1 , resp. od I_2 nakonfigurovať prúdy tak, aby sa pole otáčalo a nemenilo pri tom svoju veľkosť.

Označme pre určitost vektor magnetickej indukcie v bode symetrie pri prúdoch (0 A; 16 A) ako \mathbf{B}_1 a pri prúdoch (20 A; 0 A) ako \mathbf{B}_2 . Ďalej predpokladajme, že majú rovnakú veľkosť 215 mT a že uhly, ktoré zvierajú s osou x sú $\phi = 45^\circ$ pre \mathbf{B}_1 a $\phi = 135^\circ$ pre \mathbf{B}_2 . Dá sa ukázať, že pre ľubovoľný vektor \mathbf{B} s rovnakou veľkosťou ako B_1 a B_2 zvierajúci s osou x uhol ϕ platí vzťah

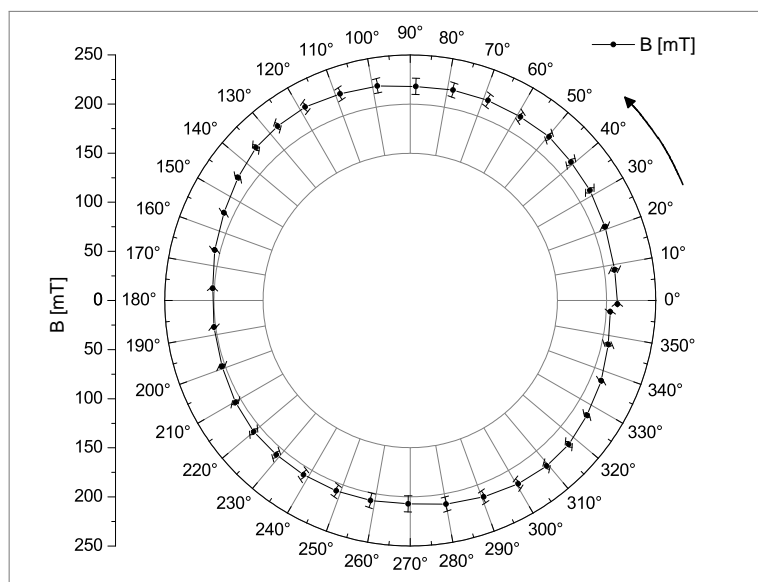
$$\mathbf{B} = \cos(\phi - \pi/4) \cdot \mathbf{B}_1 + \sin(\phi - \pi/4) \cdot \mathbf{B}_2.$$

Prúdy, ktorým odpovedajú členy násobiace B_1 a B_2 sme určovali práve zo závislosti nameranej v prechádzajúcej časti. Pre zjednodušenie tohto určovania sme si

vykreslili inverznú závislosť — závislosť prúdu I od veľkosti poľa B , ktorú možno chápať ako návod na hľadanie prúdov I_1 a I_2 pre dosiahnutie určitej veľkosti poľa. Takto otočené závislosti I_1 od B a I_2 od B sme preložili polynómami 9. stupňa, z ktorých sme po zadaní požadovanej veľkosti B_1 , resp. B_2 ihneď obdržali požadované veľkosti prúdov.

Napr. pre dosiahnutie smeru poľa $\phi = 70^\circ$ a veľkosti poľa 215 mT by sme nastavili prúdy na (4,77 A; 11,79 A).

Premerali sme teda meranú oblasť pri takej postupnosti prúdov, pri ktorej by sa pole malo v každom kroku otočiť o $\Delta\phi = 10^\circ$. Namerané hodnoty magnetickej indukcie v závislosti od nameraného uhla sme zakreslili do polárneho grafu (pozri Obr. 4.13), kde kružnica s najväčším polomerom odpovedá $B = 250$ mT a krok, ktorému odpovedá rozdiel medzi ňou a kružnicou s najbližším menším polomerom je $\Delta B = 50$ mT. Z časových dôvodov sme znova neskenovali celú oblasť, iba jej menšiu časť.

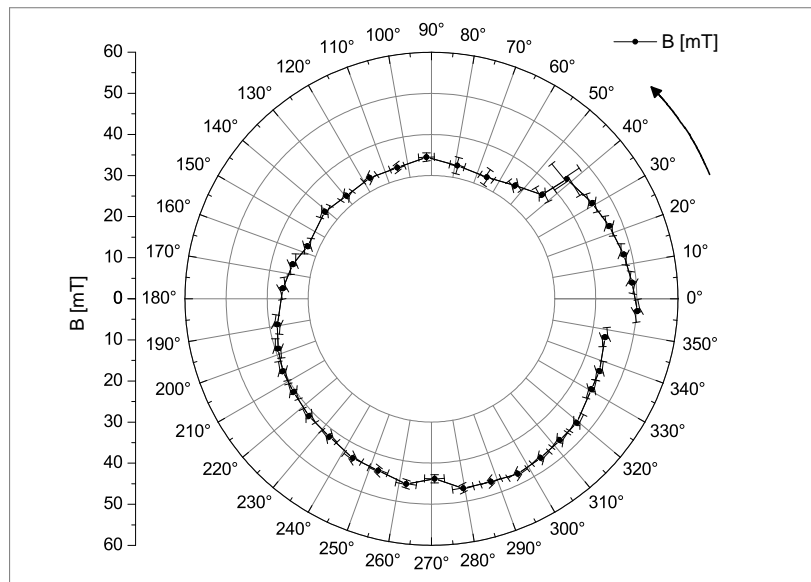


Obr. 4.13: Otáčanie magnetického poľa pri prúdoch odpovedajúcich konštantnej a maximálnej veľkosti poľa. Šípka znázorňuje smer zmeny uhlu

Na grafe je vidieť, že nameraná veľkosť magnetického poľa nie je úplne konštantná v závislosti od zmeny uhla a taktiež, že ani nameraný smer nie je vo väčšine prípadov zhodný s predpokladaným. V skutočnosti sa namerané hodnoty B pohybujú v intervale od 201,5 mT do 224 mT, pričom priemerná hodnota je 212,7 mT, čo znamená, že hodnoty nevychyľujú o viac než 6 %. Namerané hodnoty smeru poľa sa od predpokladaných líšia priemerne o menej než 2° , najväčší rozdiel činí $5,5^\circ$, čo teda už nie je v rámci chyby $u_\phi = 3^\circ$. Je znova veľmi pravdepodobné, že tieto rozdiely spôsobuje 3D hallovská mierka.

Zaujímali sme sa tiež o otáčanie poľa pri jeho menšej veľkosti, konkrétne pri $B = 50$ mT. Postup bol analogický a namerané dáta sme zakreslili do obdobného grafu (pozri Obr. 4.14). Je z neho vidieť, že priebeh je menej hladký a výchylky nameraných hodnôt od predpokladaných sú väčšie než v predchádzajúcom prípade. Konkrétne, priemerná hodnota veľkosti indukcie je 41,11 mT a priemerná výchylka činí 8,9 mT, čo je približne 21,6 %. Priemerná odchýlka smeru poľa od predpokladaného je $6,7^\circ$, pričom maximálna je $16,75^\circ$. V týchto

prípadoch rozdiely medzi nameranými a predpokladanými hodnotami nespôsobuje len samotná mierka, no s veľkou pravdepodobnosťou aj hysterézia, čo je pochopiteľné, pretože prúdy, ktorými sme mienili dosiahnuť otáčanie poľa sme určovali zo závislosti nameranej v časti 4.3 *Závislosť veľkosti magnetického poľa na prúde*, kde sme jav hysterézie nebrali do úvahy.



Obr. 4.14: Otáčanie magnetického poľa pri prúdoch odpovedajúcich konštantnej veľkosti poľa $B = 50$ mT. Šípka znázorňuje smer zmeny uhlu

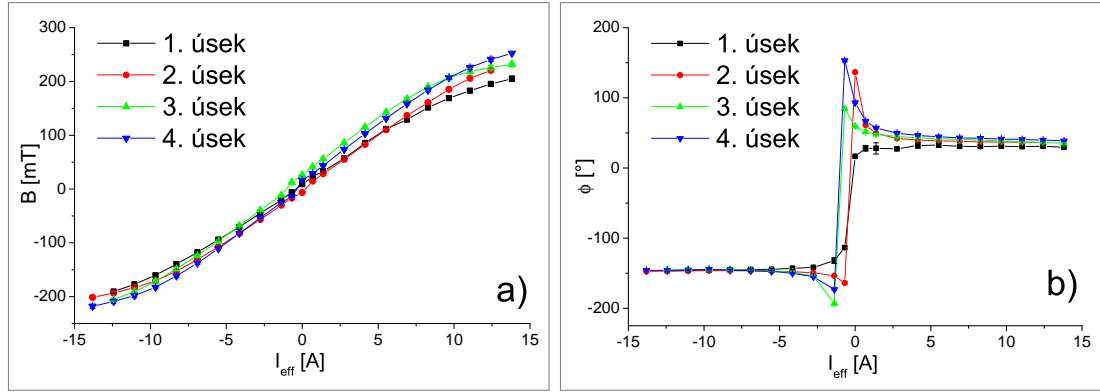
4.5 Hysterézia pri pevnom smere poľa I

V predchádzajúcej časti sme videli, že zanedbanie vplyvu hysterézie môže mať na výsledok merania nepriaznivý vplyv, a preto sme sa pozreli detailnejšie na to, ako sa správa pole pri cyklických zmenách prúdov.

Pred začiatkom merania sme cievkami elektromagnetu pustili prúdy (-20 A; 20 A), aby sme tak nastavili elektromagnet do definovaného stavu.

Zvolili sme kombináciu prúdov ($-2,85$ A; $13,51$ A), ktorá odpovedá smeru poľa približne 30° a veľkosti približne 215 mT. Prúdy sme postupne znižovali smerom k nule zachovávajúc ich pomer, pri prechode nulou sme otočili ich polaritu a zvyšovali až po ($2,85$ A; $-13,51$ A). Pri každej kombinácii prúdov sme zoskenovali menšiu časť meranej oblasti a približne v bode symetrie sme určili veľkosť a smer poľa. Tým sme premerali 1. úsek hysteréznej slučky. Analogickým postupom sme premerali ďalšie tri, t.j. dohromady 4 úseky; druhý a štvrtý samozrejme v opačných smeroch zmeny prúdu. Namerané hodnoty sme zakreslili do grafov (pozri Obr. 4.15), kde sme na x -ovú os vynášali efektívny prúd $I_{eff} \equiv (\text{sign } I_2) \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$.

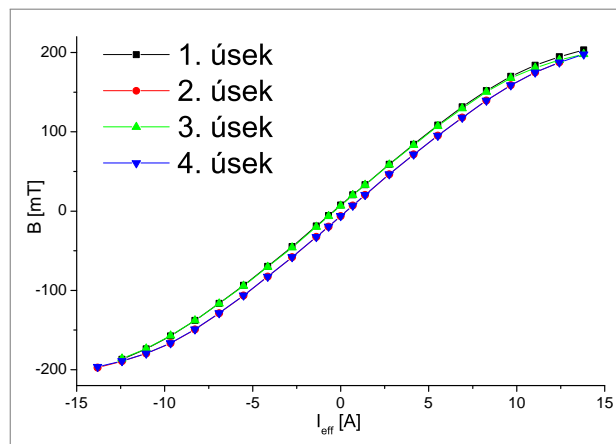
Chyby nameraných hodnôt sme stanovili rovnako ako v prechádzajúcich prípadoch, chybové úsečky však v grafoch takmer nevidieť.



Obr. 4.15: Nameraná hysterézná slučka 3D hallovskou mierkou pre smer približne 30° ; a) veľkosť poľa, b) smer poľa

Graf priebehu veľkosti poľa ukazuje neočakávané namerané hodnoty. Na základe teórie popisujúcej hysteréziu sme očakávali, že druhý a štvrtý úsek spolu splynú. V ideálnom prípade by splynul aj prvý úsek s tretím, zo skúseností s elektromagnetmi však vieme, že prvý nameraný úsek je zväčša odlišný. Nami namerané úseky sa však takmer vôbec neprekrývajú.

V grafe zobrazujúcom priebeh smeru vidíme, že v okolí nulových prúdov sa namerané hodnoty nesprávajú reprodukovateľne. Takéto správanie by mohlo byť zapríčinené hysteréziou jedine v prípade 1. úseku, nakoľko v ďalších úsekoch sme sa už s istotou pohybovali po jednoznačných vetvách hysteréznej slučky. Usudzujeme z toho, že takéto výchylky smeru a indukcie sú spôsobené chybou 3D hallovskej mierky, a preto sme sa rozhodli zopakovať túto časť merania s komerčnou mierkou. Tá neumožňuje skenovať celú oblasť rovnomerne a ani merať smer poľa, preto sme jej senzor umiestnili čo najpresnejšie do stredu meranej oblasti a pri maximálnom efektívnom prúde I_{eff} sme ju natočili tak, aby ukazovala čo najvyššiu hodnotu, čím sme zabezpečili jej natočenie kolmo na smer poľa. Pri následnom znižovaní efektívneho prúdu sme už polohu ani natočenie mierky nemenili, tým pádom sme nemerali veľkosť poľa, ale jej priemet do smeru poľa odpovedajúci maximálnemu I_{eff} . Namerané hodnoty sme zobrazili do obdobného grafu (pozri Obr. 4.16).



Obr. 4.16: Nameraná hysterézná slučka komerčnou mierkou pre smer približne 30° . Priebeh veľkosti poľa

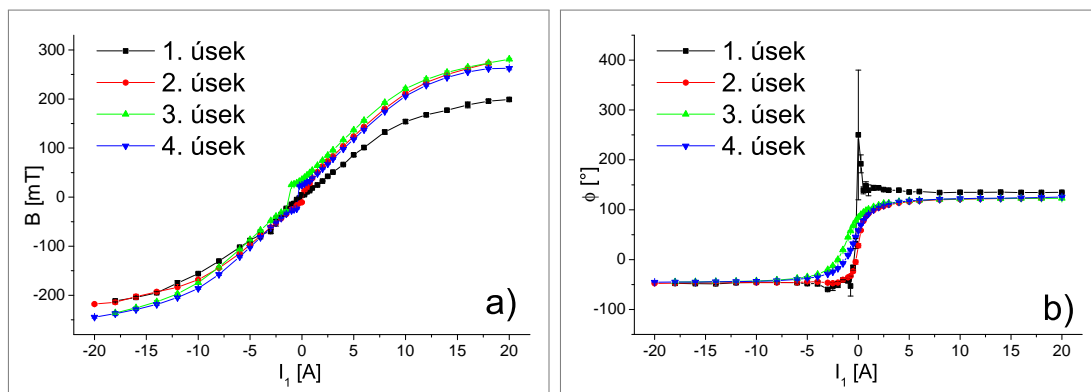
Hodnoty namerané komerčnou mierkou odpovedajú predpokladaným natoľko, že 1. a 2. úsek sú v grafe takmer úplne prekryté 3. a 4. úsekom, t.j. hodnoty sa v odpovedajúcich úsekoch hysteréznej slučky líšia iba nepatrne.

Chyby hodnôt nameraných komerčnou mierkou sme do grafu nezahrnuli, nakoľko sme nezistili aká je jej chyba. Je však veľmi pravdepodobné, že chyba je relatívne veľmi malá — namerané prekrytie takmer jednoznačne indikuje relatívne vysokú presnosť mierky.

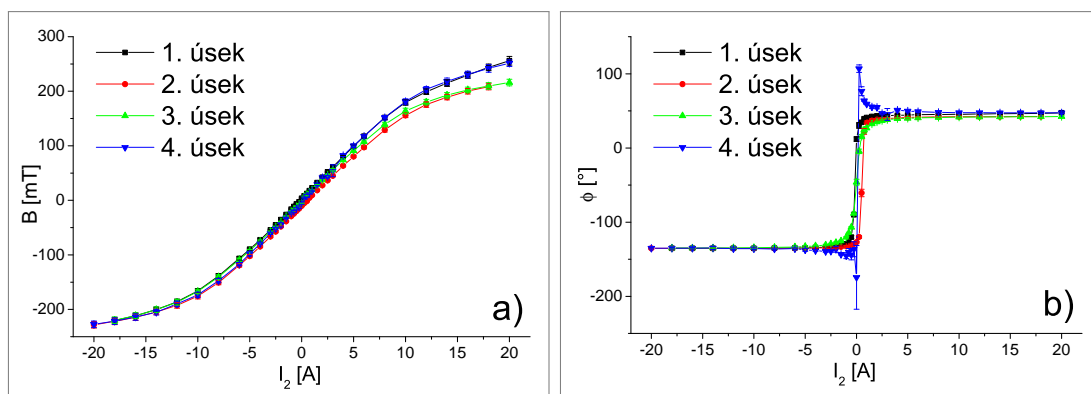
4.6 Hysterézia pri pevnom smere poľa II

Poslednou skúmanou charakteristikou elektromagnetu bol vplyv hysterézie pri takých konfiguráciách prúdov, kedy bol prúd tiekol iba jedným párom cievok, t.j. pre smery $\phi = 45^\circ$ ($I_1 = 0 \neq I_2$) a $\phi = 135^\circ$ ($I_1 \neq 0 = I_2$). Postup bol podobný ako v poslednom prípade: Cievkami sme pustili prúdy (20 A; 20 A) pre nastavenie elektromagnetu do definovaného stavu. Začali sme merať 1. úsek hysteréznej slučky od kombinácie (20 A; 0 A) so znižovaním I_1 až po (−20 A; 0 A), pričom pri každej kombinácii sme 3D hallovskou mierkou preskenovali meranú oblasť a približne v bode symetrie sme určili veľkosť a smer poľa. 2. úsek odpovedal opačným zmenám prúdov. Znova sme celkovo namerali 4 úseky. V ďalšom kroku sme celý tento postup zopakovali pri výmene $I_1 \leftrightarrow I_2$, t.j. pri vždy nulovom I_1 . Namerané závislosti veľkosti a smeru poľa od prúdu sme zakreslili do grafov (pozri Obr. 4.17 a Obr. 4.18). Chyby nameraných hodnôt sme určili rovnako ako v predchádzajúcich častiach.

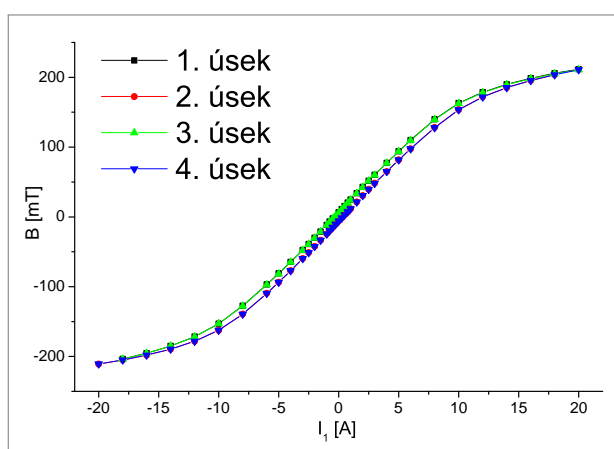
Namerané dáta vykazujú v oboch prípadoch správanie odlišné od predpokladaného, podobne ako v predchádzajúcom prípade. V prípade smeru $\phi = 45^\circ$ sa síce namerané dáta veľkosti medzi 1. a 4. úsekom a tiež medzi 2. a 3. úsekom prekrývajú, prekryv by však v prípade očakávaných dát nastal medzi 2. a 4. úsekom. Okolie nulových prúdov ukazuje pri smere $\phi = 135^\circ$ skokové zmeny veľkosti poľa v niektorých úsekoch. To znova takmer jednoznačne indikuje, že problém nie je s elektromagnetom či poľom, ale s 3D hallovskou mierkou. Usúdili sme preto znova, že meranie bude vhodné zopakovať s komerčnou mierkou. Celý postup sme teda zopakovali a namerané hodnoty veľkosti poľa sme zakreslili do analogických grafov (pozri Obr. 4.19 a Obr. 4.20)



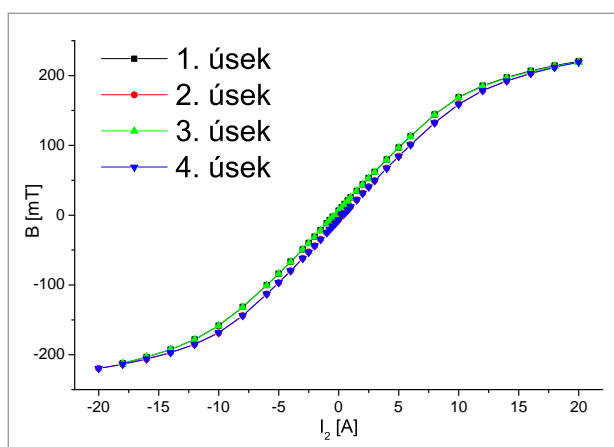
Obr. 4.17: Nameraná hysterézná slučka 3D hallovskou mierkou pre smer 135° ; a) veľkosť poľa, b) smer poľa



Obr. 4.18: Nameraná hysterézna slučka 3D hallovskou mierkou pre smer 45° ;
a) veľkosť poľa, b) smer poľa



Obr. 4.19: Nameraná hysterézna slučka komerčnou mierkou pre smer 135° . Priebeh veľkosti poľa



Obr. 4.20: Nameraná hysterézna slučka komerčnou mierkou pre smer 45° . Priebeh veľkosti poľa

Hysterézne slučky namerané komerčnou mierkou majú v oboch prípadoch takmer presne predpokladaný priebeh, v ktorom sa 1. a 3. úsek a tiež 2. a 4. úsek

prekrývajú. Taktiež veľkosť poľa je pri prechode od I k $-I$ na správnu vetvu slučky rovnaká, len opačne orientovaná.

4.7 Diskusia nameraných výsledkov

Na základe nameraných dát sa zdá, že elektromagnet sa pri meraní hysteréznych slučiek nechová reprodukovateľne (pozri Obr. 4.15, Obr. 4.17 a Obr. 4.18), čo je pre magneto-optické merania kľúčové. Nakoľko ale meranie pomocou komerčnej mierky nepotvrdilo nereprodukovateľnosť veľkosti poľa (pozri Obr. 4.16, Obr. 4.19 a Obr. 4.20), je stále možné, že veľkosť poľa sa správa dostatočne predvídavo. Je však stále otáznе, ako je to so smerom poľa, keďže komerčná mierka uhol poľa nemeria.

Keďže sme nemohli jednoznačne vyriešiť otázku reprodukovateľnosti poľa a tak ani s istotou povedať, či magnet je pri danej konfigurácii prúdov v takom, alebo inom stave, nebolo možné vykonať plánovanú záverečnú časť meraní, pri ktorých malo byť postavené experimentálne usporiadanie pre magneto-optickú detekciu hysteréznych slučiek.

Jediným riešením, ktoré pravdepodobne rozhodne o reprodukovateľnosti elektromagnetu je premeranie poľa s lepším meracím zariadením, ideálne s komerčnou mierkou schopnou merať smer poľa. Tieto merania sú plánované v najbližšej budúcnosti.

Záver

V tejto bakalárskej práci sme sa zaoberali charakterizáciou dvojdimenzionálneho elektromagnetu postaveného v nedávnej dobe. Konkrétne sme skúmali jeho schopnosť generovať magnetické polia rôznych veľkosti a smerov. Základný koncept, ktorý sme overovali bol, či je možné ovládať smer magnetického poľa pomocou použitia dvoch párov cievok (t.j. či je možné magnetická polia generované jednotlivými párami cievok považovať za vzájomne nezávislé).

Zistili sme, že pri veľkých poliach je základný koncept sčítavania polí s dobrou presnosťou použiteľný — podarilo sa nám otáčať smer magnetického poľa o uhol $\Delta\phi = 10^\circ$ s presnosťou 3° pri udržiavaní veľkosti poľa $B \simeq 213 \text{ mT}$ s presnosťou 6% a tiež sme z rezov meranou oblasťou zistili, že v oblasti veľkej približne $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ so stredom v bodoch symetrie sa veľkosť poľa mení o menej než 3% a smer poľa o menej než 3° . Taktiež celkové tvary polí sú pri veľkých prúdoch cievkami približne zhodné s predpokladanými.

Naopak pri menších poliach ostáva otázka použiteľnosti elektromagnetu stále otvorená. Dáta získané prostredníctvom 3D hallovskej mierky, ktorá dokáže merať veľkosť aj smer poľa naznačujú, že menšie polia nie sú elektromagnetom reprodukovateľné a jedným z faktorov, ktorý by pravdepodobne mohol byť reálne za toto zodpovedný, je jav hysterézie, ktorý sme podrobne preskúmali. Na druhú stranu, viac spoľahlivá komerčná mierka schopná registrovať iba veľkosť poľa nepotvrdila nereprodukovateľnosť vo veľkosti, nakoľko dáta ňou namerané mali relatívne hladký a predpokladaný priebeh aj v oblasti malých polí. Mimo iného taktiež ukázala, že hodnoty namerané 3D hallovskou mierkou nie sú veľmi spoľahlivé, čo značí, že relatívne veľký vplyv na namerané dáta pri malých poliach nemusí mať len hysterézia, ale aj samotná 3D hallovská mierka. Preto teda nie je možné v tejto fáze vysloviť jednoznačný záver ohľadom spoľahlivosti elektromagnetu. Pre vyjasnenie sú naplánované ďalšie experimenty s lepším komerčným zariadením, ktoré nebolo behom našich meraní k dispozícii.

Skutočnosť, že sme nepoznali priebeh poľa pri malých veľkostiach ani len s dobrou presnosťou zabránila meraniu poslednej plánovanej časti — magneto-optickej detekcii hysteréznych slučiek. Pokiaľ ďalšie experimenty preukážu spoľahlivosť elektromagnetu aj pri malých poliach, bude elektromagnet k tomuto účelu v budúcnosti určite použitý.

Zoznam použitej literatúry

- [1] B. Sedlák and I. Štoll. *Elektřina a magnetizmus*. Vydání 2., opravené a rozšířené. Akademie věd České republiky, Praha, 2002.
- [2] J. Li, E. Jin, H. Son, A. Tan, W. N. Cao, Chanyong Hwang, and Z. Q. Qiu. Design of a vector magnet for the measurements of anisotropic magnetoresistance and rotational magneto-optic kerr effect. *Review of Scientific Instruments*, 83(3):033906, 2012.
- [3] A. K. Zvezdin and V. A. Kotov. *Modern Magnetooptics and Magneto-optical Materials*. Institute of Physics Publishing, Bristol/Philadelphia, 1997.
- [4] Zdeněk Rafaj. *3D mapování magnetického pole měřením Hallova jevu*. Študentský projekt. MFF UK, Praha, 2014.
- [5] J. Brož a kol. *Základy fyzikálních měření I*. 1. vyd. Praha: SPN, Praha, 1983.
- [6] Naďa Tesařová. *Vplyv magnetického poľa na dynamiku spinu v polovodičoch*. Diplomová práca. MFF UK, Praha, 2008.

Zoznam obrázkov

1.1	a) Schéma kruhového závitu, b) schéma solenoidu	4
1.2	Schéma elektromagnetu	4
1.3	Hysterézná slučka	5
1.4	Hallo v jav	6
2.1	Používaný elektromagnet; a) pohľad z boku, b) celkový pohľad, c) oblasť predpokladanej homogenity spolu s mierkou	7
2.2	Hallo vské mierky: a) komerčná mierka, b) 3D hallo vská mierka . .	8
2.3	Schéma polovodičového magnetického senzora ^[4]	8
2.4	Zvolené súradnicové osi	9
3.1	Korekcia súradníc polôh senzorov X a Y voči polohe mierky . . .	10
3.2	Znázornenie smeru magnetického poľa pomocou vektorov	11
3.3	Znázornenie smeru magnetického poľa pomocou mapového grafu .	11
3.4	Časť elektromagnetu medzi cievkami použitá na kalibrovanie mierky	12
3.5	Nameraná závislosť Hallo vho napätia na magnetickej indukcii; M	13
3.6	Nameraná závislosť Hallo vho napätia na magnetickej indukcii; N .	13
4.1	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ 20 A , $I_2 = 0\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	15
4.2	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ 20 A , $I_2 = 20\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	15
4.3	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ 0 A , $I_2 = 20\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	16
4.4	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ -20 A , $I_2 = 0\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	16
4.5	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ 20 A , $I_2 = 16\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	17
4.6	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ 0 A , $I_2 = 16\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	17
4.7	Grafy nameranej magnetickej indukcie odpovedajúce prúdom $I_1 =$ -20 A , $I_2 = 16\text{ A}$; a) veľkosť, b) smer	17
4.8	Rezy meranou oblasťou; $(0\text{ A}; 16\text{ A})$	18
4.9	Rezy meranou oblasťou; $(20\text{ A}; 16\text{ A})$	19
4.10	Rezy meranou oblasťou; $(0\text{ A}; 16\text{ A})$	19
4.11	Rezy meranou oblasťou; $(-20\text{ A}; 16\text{ A})$	19
4.12	Priebeh veľkosti magnetického poľa v závislosti od prúdov prechádzajúcich cievkami. Šípky znázorňujú smer zmeny prúdu	21
4.13	Otáčanie magnetického poľa pri prúdoch odpovedajúcich konštantnej a maximálnej veľkosti poľa. Šípka znázorňuje smer zmeny uhlu	22
4.14	Otáčanie magnetického poľa pri prúdoch odpovedajúcich konštantnej veľkosti poľa $B = 50\text{ mT}$. Šípka znázorňuje smer zmeny uhlu .	23
4.15	Nameraná hysterézná slučka 3D hallo vskou mierkou pre smer približne 30° ; a) veľkosť poľa, b) smer poľa	24
4.16	Nameraná hysterézná slučka komerčnou mierkou pre smer približne 30° . Priebeh veľkosti poľa	24

4.17	Nameraná hysterézna slučka 3D hallovskou mierkou pre smer 135° ; a) veľkosť poľa, b) smer poľa	25
4.18	Nameraná hysterézna slučka 3D hallovskou mierkou pre smer 45° ; a) veľkosť poľa, b) smer poľa	26
4.19	Nameraná hysterézna slučka komerčnou mierkou pre smer 135° . Pribeh veľkosti poľa	26
4.20	Nameraná hysterézna slučka komerčnou mierkou pre smer 45° . Pribeh veľkosti poľa	26